

50

InL Cl. 2:

H 01 S 3-19

19 BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT



7  
9  
7  
DT 12 97 250 C2

11

# Patentschrift 12 97 250

21

Aktenzeichen: P 12 97 250.8-33

22

Anmeldetag: 3. 4. 65

23

Offenlegungstag: —

24

Bekanntmachungstag: 12. 6. 69

25

Ausgabetag: 10. 4. 75

Patentschrift weicht von der Auslegeschrift ab

30

Unionspriorität:

32 33 31

3. 4. 64 USA 357188

54

Bezeichnung:

Optischer Sender mit einem Halbleiterdioden-Medium

73

Patentiert für:

General Electric Company, Schenectady, N.Y. (V.St.A.)

74

Vertreter:

Endlich, F., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 8034 Unterpfaffenhofen

77

Erfinder:

Fenner, Gunther Erwin, Schenectady, N.Y. (V.St.A.)

56

Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

Elektronik, März 1963, Nr. 3, S. 78

Bell System Techn. Journal, 41 (1962),

Proc IRE, 49 (1961), S. 1635-1639

S. 1371-1397

Lengyel, B. A. Lasers, New York, (1962), S. 92-93

In Betracht gezogene ältere Patente:

Quantum Electronics, Paris 1963

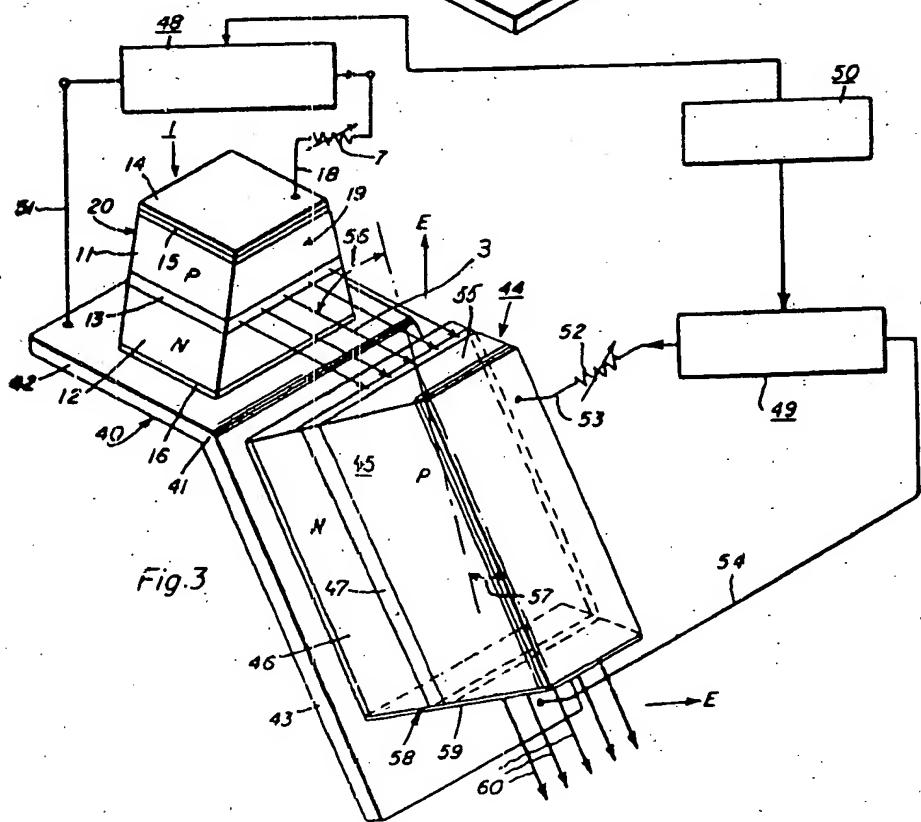
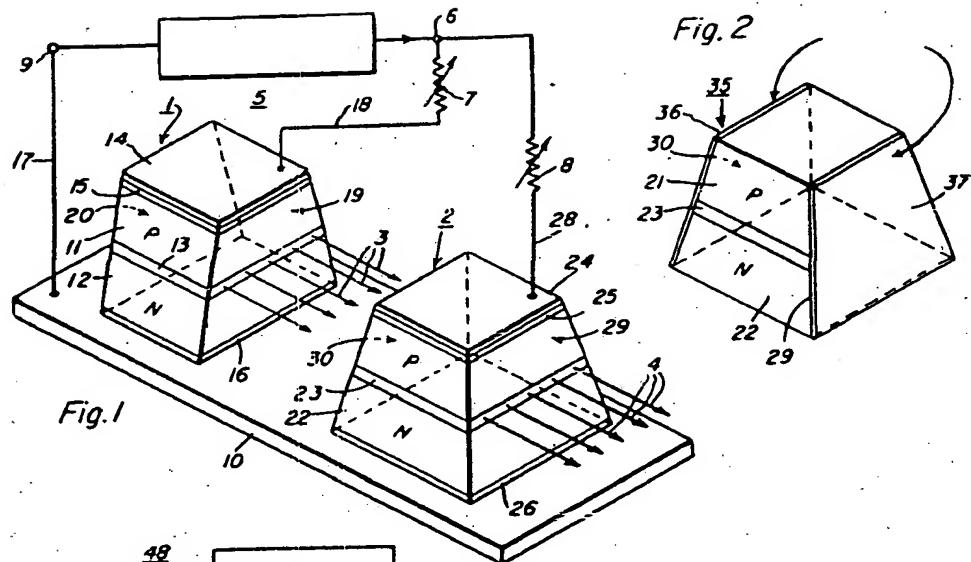
DT-PS 11 86 148

Conference, Vol. 2, S. 999-1019

DT-PS 12 20 054

Proc IEEE, 15 (1963), S. 4-29

Best Available Copy



## Patentansprüche:

1. Optischer Sender mit einem Halbleiterdioden-Medium zur Erzeugung kohärenter Strahlung hoher Intensität, mit einem ersten und einem zweiten davon getrennt angeordneten monokristallinen, direkte Übergänge ermöglichen den Halbleitermedium, von denen jedes einen entartet p-leitenden und einen entartet n-leitenden Bereich sowie einen dünnen pn-Übergang dazwischen aufweist, deren erstes bei Polung in Durchlaßrichtung kohärente Strahlung aus seinem pn-Übergang in mindestens einer Richtung bei elektrischer Anregung oberhalb eines vorher bestimmten Schwellenwerts aussendet, wobei es mindestens zwei gegenüberliegende Oberflächen aufweist, die parallel zueinander und senkrecht zu seinem Übergang verlaufen, dadurch gekennzeichnet, daß das zweite Halbleitermedium (2) nicht parallel verlaufende Oberflächen (29, 30) aufweist, die seinen pn-Übergang (23) schneiden und so getrennt von dem ersten Halbleitermedium verlaufen, daß die kohärente Strahlung auf den pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums durch eine der nicht parallelen Oberflächen auftrifft, ferner die in seinem pn-Übergang eintretende kohärente Strahlung kolinear in Abhängigkeit von einer Vorspannung seines Übergangs in Durchlaßrichtung verstärkt, und daß die eine nicht parallele Oberfläche (29, 30) einen antireflektierenden Überzug (37, 36) mindestens im Bereich ihrer Schnittfläche mit dem pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums hat, so daß eine kohärente Strahlung (4) hoher Intensität aus dem zweiten Halbleitermedium austritt, deren Frequenz der von dem ersten Halbleitermedium ausgesandten kohärenten Strahlung gleich ist (Fig. 1, 2).

2. Optischer Sender nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die pn-Übergänge (13, 23) der beiden Halbleitermedien (1, 2) in einer gemeinsamen Ebene liegen.

3. Optischer Sender nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß auch die andere nicht parallele Oberfläche [30 (29)], die gegenüber der einen Oberfläche [29 (30)] liegt, einen antireflektierenden Überzug (36, 37) mindestens im Bereich ihrer Schnittfläche mit dem pn-Übergang (23) des zweiten Halbleitermediums (2) hat (Fig. 2).

4. Optischer Sender nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Halbleitermedium (1) einen Schwellstrom ( $I_{T_1}$ ) zur Strahlungserzeugung durch stimuliertes Emission in dem durch seinen pn-Übergang (13) gebildeten Resonator hat, daß das zweite Halbleitermedium (2) einen Schwellstrom ( $I_{T_2}$ ) zur Strahlungserzeugung durch stimuliertes Emission in dem durch seinen pn-Übergang (23) gebildeten Resonator hat und daß der Abstand zwischen den beiden Halbleitermedien klein genug ist, damit der ihnen gleichzeitig zuzuführende Gesamtstrom ( $I_{T_r}$ ) zur Strahlungserzeugung durch stimuliertes Emission in dem Sender niedriger als die Summe der einzelnen Schwellströme ( $I_{T_1}$ ) und ( $I_{T_2}$ ) ist.

5. Optischer Sender nach Anspruch 1, 2 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Halbleitermedien (1, 44) so ausgebildet und relativ zueinander angeordnet sind, daß der Einfallwinkel (56) der Strahlung (3) auf die eine nicht parallele Oberfläche (55) praktisch gleich dem Komplementwinkel des Brechungswinkels (57) der Strahlung (Brewster-Winkel) in den pn-Übergang (47) des zweiten Halbleitermediums (44) ist, und daß die kohärente Strahlung (3) aus dem ersten Halbleitermedium (1) in der Einfallebene der Strahlung auf die eine nicht parallele Oberfläche (55) polarisiert ist (Fig. 3).

Die Erfindung betrifft einen optischen Sender mit einem Halbleiterdioden-Medium zur Erzeugung kohärenter Strahlung hoher Intensität, mit einem ersten und einem zweiten davon getrennt angeordneten monokristallinen, direkte Übergänge ermöglichen den Halbleitermedium, von denen jedes einen entartet p-leitenden und einen entartet n-leitenden Bereich sowie einen dünnen pn-Übergang dazwischen aufweist, deren erstes bei Polung in Durchlaßrichtung kohärente Strahlung aus seinem pn-Übergang in mindestens einer Richtung bei elektrischer Anregung oberhalb eines vorher bestimmten Schwellenwerts aussendet, wobei es mindestens zwei gegenüberliegende Oberflächen aufweist, die parallel zueinander und senkrecht zu seinem Übergang verlaufen.

Es ist bereits ein Halbleiterdioden-Laser bekannt (vgl. »Elektronik«, Nr. 3, März 1963, S. 78), der aus einem leicht trapezförmig geschnittenen GaAs-Würfel besteht, wobei die beiden nicht abgeschrägten Seitenwände genau planparallel poliert sind und das Licht senkrecht zu diesen Wänden austritt. Der pn-Übergang in dem mit Tellur gedopten Galliumarsenid wird durch Eindiffundieren von Zink hergestellt.

Es ist auch bereits ein optischer Sender mit einem Halbleiterdioden-Medium vorgeschlagen worden (vgl. deutsche Patentschrift 1220054), das in Richtung der Übergangsfläche ausstrahlt, wobei mindestens zwei Ohmsche Kontaktelktroden auf ein und derselben und parallel zur Übergangsfläche verlaufenden Oberfläche des Halbleiterdioden-Mediums senkrecht aufgesetzt sind, unabhängig voneinander geschaltet werden können und, wenn ihr Strom einen vorbestimmten Schwellenwert übersteigt, das Halbleitermedium zur Lichtstrahlung anregen. Bei der Lichterzeugung durch derartige optische Sender soll jedoch die Intensität unerwünschter Schwingungen oder von Streustrahlung od. dgl. möglichst klein gehalten werden, weshalb die optischen Sender nicht wesentlich über ihrem Schwellenwert erregt werden. Dadurch wird jedoch die Erzeugung kohärenter Strahlung hoher Intensität verhindert.

Um eine Lichtverstärkung vornehmen zu können, ist es bereits bekannt (vgl. »Elektronik«, Nr. 3, März 1963, S. 78), einem Halbleiterdioden-Laser ein relativ aufwendiges optisches System mit Linse, Spiegel und Photovervielfacherröhre nachzuschalten. Es ist auch bereits vorgeschlagen worden (vgl. deutsche Patentschrift 11.86148), Licht vom Ausgang eines ersten optischen Diodenlichtverstärkers zur Lichtverstärkung über ein verhältnismäßig aufwendiges opti-

sches System mit einer Linse dem Eingang eines zweiten optischen Diodenlichtverstärkers zuzuführen. Um dabei eine Selbsterregung des Lichtverstärkers zu vermeiden, wird der Speisestrom der beiden optischen Lichtverstärker durch periodische Impulse moduliert, und verschiedene Bedingungen sind von der Laufzeit des Lichts zwischen den beiden optischen Lichtverstärkern und der Impulsfrequenz zu erfüllen.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, einen optischen Sender mit einem Halbleitermedium so auszubilden, daß er in der Nähe seines Schwellenwerts betrieben wird und trotzdem ohne ein aufwendiges optisches System die Erzeugung kohärenter Strahlung hoher Intensität gestattet.

Ein optischer Sender der eingangs genannten Art ist gemäß der Erfindung dadurch gekennzeichnet, daß das zweite Halbleitermedium nicht parallel verlaufende Oberflächen aufweist, die seinen pn-Übergang schneiden und so getrennt von dem ersten Halbleitermedium verlaufen, daß die kohärente Strahlung auf den pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums durch eine der nicht parallelen Oberflächen auftrifft, ferner die in seinen pn-Übergang eintretende kohärente Strahlung kolinear in Abhängigkeit von einer Vorspannung seines Übergangs in Durchlaßrichtung verstärkt, und daß die eine nicht parallele Oberfläche einen antireflektierenden Überzug mindestens im Bereich ihrer Schnittfläche mit dem pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums hat, so daß eine kohärente Strahlung hoher Intensität aus dem zweiten Halbleitermedium austritt, deren Frequenz der von dem ersten Halbleitermedium ausgesandten kohärenten Strahlung gleich ist.

Unter kolinearer Verstärkung soll hier verstanden werden, daß in den pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums eintretende Strahlung ihre Richtung bei Ausbreitung in dem pn-Übergang unter gleichzeitiger Intensitätsverstärkung beibehält, bis die Strahlung aus dem Übergang aus der der Eintritts-oberfläche gegenüberliegenden Oberfläche verstärkt austritt, ohne daß eine Rückkopplung erfolgt. Anders ausgedrückt, bei einer kolinearen Verstärkung wird einer sich in einer bestimmten Richtung ausbreitenden elektromagnetischen Welle zunehmend Energie zugeführt. Durch die kolineare Verstärkung wird vorteilhafterweise eine hohe Verstärkung der vom ersten Halbleitermedium empfangenen Strahlung vorgenommen, wobei gleichzeitig die verstärkte Strahlung hinsichtlich Frequenz, Polarisation und Spektrum der vom ersten Halbleitermedium empfangenen Strahlung weitgehend gleicht und der Einfluß vieler Parameter des optischen Senders wie der Abmessungen des zweiten Halbleitermediums und seines Abstands vom ersten Halbleitermedium auf die Strahlung des ersten Halbleitermediums unterdrückt wird.

Die vorteilhafte kolineare Verstärkung wird bei dem optischen Sender gemäß der Erfindung dadurch erreicht, daß die das zweite Halbleitermedium durchlaufende Strahlung die nicht zueinander parallelen Oberflächen durchsetzt und die eine nicht parallele Oberfläche einen antireflektierenden Überzug aufweist. Dadurch wird eine die kolineare Verstärkung beeinträchtigende Strahlungsreflexion und damit -rückkopplung in dem zweiten Halbleitermedium selbst und von ihm zum ersten Halbleitermedium vermieden.

Zur weiteren Verringerung der Gefahr einer Strah-

lungsrückkopplung kann der optische Sender so ausgebildet sein, daß auch die andere nicht parallele Oberfläche, die gegenüber der einen Oberfläche liegt, einen antireflektierenden Überzug mindestens im Bereich ihrer Schnittfläche mit dem pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums hat.

Eine vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung kann darin bestehen, daß die Halbleitermedien so ausgebildet und relativ zueinander angeordnet sind, daß der Einfallswinkel der Strahlung auf die eine nicht parallele Oberfläche praktisch gleich dem Komplementwinkel des Brechungswinkels der Strahlung (Brewster-Winkel) in den pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums ist, und daß die kohärente Strahlung aus dem ersten Halbleitermedium in der Einfallsebene der Strahlung auf die eine nicht parallele Oberfläche polarisiert ist. Das hat den Vorteil, daß die gesamte einfallende polarisierte Strahlung gemäß dem Brewsterschen Gesetz gebrochen wird, also keine Teilreflektion erleidet, was eine unerwünschte Rückkopplung bedeuten würde.

An Hand der Zeichnung soll die Erfindung näher erläutert werden. Es zeigt

Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines ersten Ausführungsbeispiels des optischen Senders gemäß der Erfindung.

Fig. 2 eine perspektivische Ansicht eines abgewandelten Ausführungsbeispiels des in Fig. 1 dargestellten zweiten Halbleitermediums des optischen Senders und

Fig. 3 eine perspektivische Ansicht eines weiteren Ausführungsbeispiels des optischen Senders gemäß der Erfindung.

Der in Fig. 1 dargestellte optische Sender mit einem Halbleiterdioden-Medium zur Erzeugung kohärenter Strahlung hoher Intensität weist ein erstes Halbleitermedium 1 und ein zweites Halbleitermedium 2 auf, das so angeordnet ist, daß es Strahlung 3 des ersten Halbleitermediums und verstärkte kohärente Strahlung 4 abgibt. Eine geeignete Anregung der Halbleitermedien 1 und 2 erfolgt durch eine schematisch dargestellte Impulsquelle 5 zur Erzeugung gleichpoliger elektrischer Impulse. Die Einstellung des Anregungsverhältnisses wird durch die Verbindung eines Ausgangsanschlusses 6 der Impulsquelle 5 mit dem ersten Halbleitermedium 1 und dem zweiten Halbleitermedium 2 über einstellbare Reihenwiderstände 7 und 8 erleichtert. Der Stromkreis wird von einem Erdanschluß 9 der Impulsquelle 5 über ein gemeinsames Kopfstück 10 aus Leitermaterial geschlossen, welches die beiden Halbleitermedien verbindet und trägt. Ein Leiter 17 verbindet den Erdanschluß 9 und das Kopfstück 10.

Das in Fig. 1 dargestellte erste Halbleitermedium 1 ist ein einkristallines Halbleitermedium mit einem entartet dotierten p-leitenden Bereich 11 und einem entartet dotierten n-leitenden Bereich 12. Diese beiden Bereiche sind durch einen dünnen pn-Übergang 13 getrennt. Ein nicht gleichrichtender Kontakt besteht zwischen dem p-leitenden Bereich 11 und einer ersten Elektrode 14 mit Hilfe einer akzeptorartigen oder elektrisch neutralen Lötsschicht 15, während eine nicht gleichrichtende Verbindung zwischen dem n-leitenden Bereich 12 und dem Kopfstück 10 über eine donatorartige oder elektrisch neutrale Lötsschicht 16 besteht. Die Leiter 17 und 18 sind mit dem Kopfstück 10 bzw. der Elektrode 14 beispielsweise verschweißt oder verlötet. Gegenüberliegende Ober-

flächen 19 und 20 des ersten Halbleitermediums 1 sind so geschliffen oder poliert, daß sie genau parallel zueinander verlaufen, damit stehende Wellen in dem Halbleitermedium in dem Übergang 13 zur Erzeugung einer kohärenten Strahlung mit hohem Wirkungsgrad ausgebildet werden. Derartige parallele reflektierende Oberflächen 19 und 20 sind als Fabry-Perot-Platten bekannt.

Das zweite Halbleitermedium 2 ist ein einkristallines Halbleitermedium mit einem entartet dotierten p-leitenden Bereich 21 und einem entartet dotierten n-leitenden Bereich 22. Diese beiden Bereiche sind in entsprechender Weise durch einen pn-Übergang 23 getrennt. Wie bei dem ersten Halbleitermedium 1 besteht ein nicht gleichrichtender Kontakt zwischen dem p-leitenden Bereich 21 und einer ersten Elektrode 24 durch eine akzeptorartige oder elektrisch neutrale Lötsschicht 25, während ein nicht gleichrichtender Kontakt zwischen den n-leitenden Bereich 22 und dem Kopfstück 10 durch eine donatorartige oder elektrisch neutrale Lötsschicht 26 besteht. Der Leiter 28 ist mit der Elektrode 24 beispielsweise verschweißt oder verlötet. Gegenüberliegende Oberflächen 29 und 30 des zweiten Halbleitermediums 2, welche im allgemeinen in der relativen räumlichen Anordnung den Oberflächen 19 bzw. 20 des ersten Halbleitermediums 1 entsprechen, sind jedoch aus noch zu erläuternden Gründen nicht planparallel geschliffen und poliert.

Die Schnittfläche des pn-Übergangs 23 und der Oberfläche 30 weist in Richtung der Strahlung 3 von dem ersten Halbleitermedium 1 einen Abstand auf. Vorzugsweise verlaufen die pn-Übergänge 13 und 23 im wesentlichen koplanar, falls die betreffenden pn-Übergänge eben sind, wie in Fig. 1 dargestellt ist. Damit die Kopplung der Strahlung von dem ersten Halbleitermedium 1 zu dem zweiten Halbleitermedium 2 begünstigt wird, ist der Abstand zwischen den Oberflächen 19 und 30 vorteilhaft sehr klein und beträgt vorzugsweise zwischen 10 und 200 Wellenlängen der vom ersten Halbleitermedium 1 ausgesandten Strahlung. Ein Abstand unterhalb des Bereichs könnte den Wirkungsgrad der Oberfläche 19 als Fabry-Perot-Reflektor verringern. Ein beträchtlich größerer Abstand als entsprechend 200 Wellenlängen würde dagegen in vielen Fällen die Verwendung von Fokussierlinsen erforderlich machen, deren Vorhandensein normalerweise unerwünscht ist.

Erfindungsgemäß kann das zweite Halbleitermedium 2 die in seinen pn-Übergang 23 eintretende kohärente Strahlung kolinear verstärken. Unter der Bezeichnung »kolineare Verstärkung« ist zu verstehen, daß in den pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums 2 eintretende Strahlung praktisch in gleicher Richtung wie beim Eintritt sich entlang des pn-Übergangs mit Intensitätszunahme ausbreitet; bis die Ausbreitung in dem pn-Übergang vollendet ist und die Strahlung aus dem Übergang aus der der Eintrittsfläche gegenüberliegenden Oberfläche verstärkt austritt, ohne daß eine Rückkopplung erfolgt. Die kolineare Verstärkung kann auch so erklärt werden, daß sie einer sich in einer bestimmten Richtung ausbreitenden Welle Energie zuführt. Eine Reflexion der Strahlung, die zu einer Rückkopplung in dem zweiten Halbleitermedium 2 führen könnte, wird auf einem Minimum gehalten, ebenso wie die Reflexion von Strahlung zurück zu dem ersten Halbleitermedium 1, welche in den pn-Übergang des zweiten

Halbleitermediums 2 eingetreten ist. Deshalb wird eine Rückkopplung in dem zweiten Halbleitermedium 2 und eine Rückkopplung von dem zweiten Halbleitermedium 2 zu dem ersten Halbleitermedium 1 auf einem Minimum gehalten, wenn das zweite Halbleitermedium 2 eine kolineare Verstärkung in dem erwähnten Sinn durchführt.

In dem in Fig. 1 dargestellten optischen Sender gewährleistet das zweite Halbleitermedium 2 eine kolineare Verstärkung, indem die Oberfläche 29, aus welcher die verstärkte kohärente Strahlung hoher Intensität austritt, nicht parallel zu der Oberfläche 30 verläuft, auf welche die Strahlung 3 von dem ersten Halbleitermedium 1 zuerst austritt, und indem der Widerstand 8 so eingestellt wird, daß eine ausreichende elektrische Anregung des Übergangs 23 erfolgt, um eine Inversion der Besetzungsverteilung in dem Übergang 23 auf einem Niveau zu erzeugen, das unter dem Schwellenwert liegt, bei welchem eine gesteuerte Emission in dem Übergang 23 erzeugt werden kann. Vorzugsweise ist jede der Oberflächen des zweiten Halbleitermediums 2, welche den Übergang 23 schneidet, im wesentlichen nicht parallel zu irgendeiner anderen dieser Oberflächen angeordnet, um eine Rückkopplung zu verringern.

Es ist aus verschiedenen Gründen wichtig, daß das zweite Halbleitermedium 2 eine kolineare Verstärkung ermöglicht, insbesondere um den Einfluß des zweiten Halbleitermediums 2 auf die Eigenart der vom ersten Halbleitermedium 1 ausgesandten Strahlung mit Ausnahme der gewünschten Erhöhung der Intensität klein zu halten, und um eine maximale Ausgangsintensität der Strahlung aus dem zweiten Halbleitermedium 2 zu gewährleisten. Die kolineare Verstärkung verbessert die Wiedergabeteue des zweiten Halbleitermediums 2 und begünstigt, daß die davon austretende Strahlung mit Ausnahme der Intensität nahezu gleich der empfangenen Strahlung ist. Ferner wird der Einfluß vieler Parameter des optischen Senders wie der Abmessungen des zweiten Halbleitermediums 2 und dessen Abstand von dem ersten Halbleitermedium 1 auf die Frequenz, die Polarisation und die spektralen Eigenschaften der von dem ersten Halbleitermedium 1 ausgesandten kohärenten Strahlung minimal gehalten.

Obwohl eine Rückkopplung in dem zweiten Halbleitermedium 2 bewirkt werden kann, beispielsweise durch Erhöhung der inneren Reflexion an der Oberfläche 29, um den Verstärkungsfaktor des zweiten Halbleitermediums 2 zu erhöhen, ist dies bei dem zweiten Halbleitermedium des optischen Senders gemäß der Erfindung nicht wünschenswert, weil eine derartige Erhöhung der Verstärkung auf Kosten einer Erhöhung des Einflusses der verschiedener Parameter des zweiten Halbleitermediums auf die schließliche Ausgangsstrahlung hoher Intensität erfolgen würde.

Eine geeignete Ausbildung des zweiten Halbleitermediums 2 zur Erzielung der kolinearen Verstärkung erhöht auch die Ausgangsintensität, die mit dem Sender erzielbar ist. Dies läßt sich durch die Annahme erklären, daß eine vorherbestimmte Anzahl von Elektronen vorhanden ist, die in das Leitfähigkeitsband durch eine gegebene Größe des Anregungsstroms gebracht werden. Der Verstärkungsfaktor des zweiten Halbleitermediums 2 ändert sich in derselben Richtung wie Änderungen der Stromdichte in dem Übergang. Wenn reflektierte Strahlung, Streustrah-

lung oder spontane Schwingungen zugelassen werden, um einen Teil der verfügbaren injizierten Elektronen zu verbrauchen, wird die Verstärkung des zweiten Halbleitermediums 2 bei der Frequenz der empfangenen Strahlung 3 verringert.

Der Verstärkungsfaktor des zweiten Halbleitermediums 2 wird in vorteilhafter Weise erhöht, ohne daß unerwünschte Reflexionen oder Rückkopplungen auftreten, indem die Länge des Übergangs in Richtung der empfangenen Strahlung erhöht wird. Allgemein betrachtet steigt die Intensität der Strahlung, die sich durch den pn-Ubergang des zweiten Halbleitermediums 2 ausbreitet, exponentiell mit dem zurückgelegten Abstand, weshalb eine verhältnismäßig kleine Erhöhung der Länge des Übergangs in Richtung der Wellenausbreitung zu einer beträchtlichen Erhöhung der nutzbaren Ausgangsleistung führt.

Das Material zur Herstellung des ersten Halbleitermediums 1 und des zweiten Halbleitermediums 2 ist normalerweise monokristallin und kann im allgemeinen ein Mehrstoffhalbleiter oder eine Legierung von Mehrstoffhalbleitern der III. und V. Gruppe des Periodischen Systems der Elemente sein, welche Materialien als Halbleiter mit direktem Übergang (also Halbleiter, die direkte Übergänge von Elektronen zwischen dem Valenz- und dem Leitfähigkeitsband ermöglichen) bezeichnet werden. Dazu gehören beispielsweise Galliumarsenid, Indiumantimonid, Indiumarsenid, Indiumphosphid, Galliumantimonid und Legierungen davon sowie einen direkten Übergang ermöglichte Legierungen anderer Materialien wie Legierungen von Galliumarsenid und Galliumphosphid (das selbst keine direkten Übergänge gestattet) in dem Bereich von Null bis 50 Atomprozent von Galliumphosphid. Andere geeignete Materialien, die direkte Übergänge ermöglichen, sind Bleisulfid, Bleiselenid und Bleitellurid. In den zuletzt genannten Materialien ist Indium als Donator und ein überschüssiges Anion als Akzeptor geeignet. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung hängt von der Banddifferenz (Energiedifferenz zwischen dem Leitfähigkeitsband und dem Valenzband des ausgewählten Halbleiters) ab. Die Halbleitermaterialien für das erste Halbleitermedium 1 und das zweite Halbleitermedium 2 sind vorzugsweise solche Materialien, welche im wesentlichen dieselbe Banddifferenz aufweisen. Ferner werden das erste Halbleitermedium 1 und das zweite Halbleitermedium 2 vorzugsweise aus demselben Halbleitermaterial hergestellt.

Sowohl der n-leitende als auch der p-leitende Bereich des Halbleitermediums 1 sind mit Donatoren bzw. Akzeptoren als Aktivatoren dotiert, um darin eine Entartung hervorzurufen. Im Sinne dieser Beschreibung kann ein Halbleitermedium als entartet n-leitend bezeichnet werden, wenn es eine ausreichende Konzentration überschüssiger Donatorträger oder als Donator dienender Verunreinigungen enthält, um dessen Fermi-Niveau auf einen Energiebetrag anzuheben, der größer als die minimale Energie des Leitfähigkeitsbands im Energiebanddiagramm des halbleitenden Materials ist. Bei einem p-leitenden Bereich bedeutet die Entartung, daß eine ausreichende Konzentration von überschüssigen Akzeptorträgern oder als Akzeptor dienender Verunreinigungen vorhanden ist, um das Fermi-Niveau auf eine Energie herabzusetzen, die niedriger als die maximale Energie des Valenzbands im Energiebanddiagramm des halbleitenden Materials ist. Eine Entartung kann im

allgemeinen erzielt werden, wenn die überschüssige negative Leitfähigkeitsträgerkonzentration  $10^{17}/\text{cm}^3$  überschreitet oder wenn die überschüssige positive Leitfähigkeitsträgerkonzentration  $10^{18}/\text{cm}^3$  überschreitet. Das Fermi-Niveau eines derartigen Energiebanddiagramms entspricht der Energie, bei der die Wahrscheinlichkeit für die Anwesenheit eines Elektrons in einem speziellen Zustand gleich 1:2 ist.

Die Materialien zur entarteten Dotierung der n- und p-leitenden Bereiche der verschiedenen Halbleiter, aus denen optische Sender gemäß der Erfindung hergestellt werden können, hängen von dem verwandten halbleitenden Material ab und müssen nicht in jedem Falle dieselben sein, obwohl diese Materialien derselben Klasse angehören können. So sind für alle Mehrstoffkörper der III. und der V. Gruppe Schwefel, Selen und Tellur als Donatoren, Zink, Cadmium, Quecksilber und Cäsium als Akzeptoren geeignet, während andererseits die Elemente Zinn, Germanium und Silizium entweder als Donator oder als Akzeptoren dienen können, was von dem speziellen Halbleiter und dem Herstellungsverfahren abhängt. Zum Beispiel sind sie alle Akzeptoren in Galliumantimonid, das aus einer stöchiometrischen Schmelze gezogen ist. In Indiumantimonid ist Zinn ein Donator, während Germanium und Silizium Akzeptoren sind. In den restlichen Halbleitern mit direktem Übergang der Gruppe A III/B V sind Zinn, Germanium und Silizium alle Donatoren. Irgendein Donator- und Akzeptorpaar, das eine ausreichend hohe Löslichkeit für das zur Herstellung des Halbleiterkristalls verwandte Material besitzt, kann dazu verwandt werden, die entartet dotierten Bereiche des ersten Halbleitermediums 1 und des zweiten Halbleitermediums 2 zu bilden.

Obwohl eine Anzahl Verfahren zur Herstellung des ersten Halbleitermediums 1 und des zweiten Halbleitermediums 2 Verwendung finden kann, soll im folgenden ein besonders zweckmäßiges Herstellungsverfahren erläutert werden. Ein optischer Sender der in Fig. 1 dargestellten Art kann ausgebildet werden, indem ein ländliches Plättchen aus einem monokristallinen Rohling aus n-leitendem Galliumarsenid verwandt wird, das zu etwa  $10^{18}$  Atomen/ $\text{cm}^3$  mit Tellur dotiert wird. Die Dotierung wird in zweckmäßiger Weise durch Ziehen aus einer Schmelze aus Galliumarsenid erzielt, die mindestens  $5 \times 10^{18}$  Atome Tellur/ $\text{cm}^3$  enthält, damit der erhaltene Kristall entartet n-leitend ist. Ein pn-Ubergang wird in einem horizontalen, an eine Oberfläche angrenzenden Bereich des Kristalls durch Eindiffusion von Zink in alle Oberflächen davon bei einer Temperatur von etwa  $900^\circ\text{C}$  während etwa einer halben Stunde hergestellt, wobei ein evakuiertes abgedichtetes Quarzrohr Verwendung findet, das den Galliumarsenidkristall und 10 mg Zink enthält. Der so ausgebildete pn-Ubergang liegt etwa 0,05 mm unter den Oberflächen des Kristalls. Das kristalline Plättchen wird dann ausgeschnitten und geschliffen, um den p-leitenden Bereich mit Ausnahme in dem Bereich in der Nähe einer horizontalen Oberfläche zu entfernen.

Dann werden die beiden Halbleitermedien auf dem Halbleiterkristall ausgeschnitten. Das erste Halbleitermedium kann in vorteilhafter Weise eine Dicke von 0,5 mm und eine jeweilige Kantenlänge von 0,4 mm besitzen. Das zweite Halbleitermedium kann in vorteilhafter Weise eine Dicke von 0,5 mm und eine Kantenlänge von 0,4 mm für diejenige

Kanten besitzen, die quer zu der Richtung verlaufen, in welcher sich der Übergang linear erstreckt und in welcher Richtung die Ausbreitung der zu verstärkenden Strahlung erfolgt. Jede gewünschte Länge entlang der anderen Kanten, welche den gewünschten Übergangsbereich und die Länge des Ausbreitungswege gewährleistet, um die gewünschte Ausgangsleistung des zweiten Halbleitermediums 2 zu erzielen, kann Verwendung finden. In vorteilhafter Weise beträgt die letztere Abmessung zwischen 0,2 und 2 mm. Zwei gegenüberliegende Oberflächen des ersten Halbleitermediums werden dann abgespalten oder auf optische Glätte poliert, so daß sie im wesentlichen exakt planparallel sind und senkrecht zu dem pn-Übergang verlaufen.

Obwohl es nicht unbedingt erforderlich ist, werden die Halbleitermedien zweckmäßigerverweise auf einem gemeinsamen Kopfstück angebracht, das aus einem guten elektrischen und Wärmeleiter wie Kupfer, Silber oder Aluminium besteht. Danach werden die betreffenden Elektroden an den Halbleitermedien angelötet. Bei der Verwendung des erwähnten Galliumarsenids ist ein geeignetes Akzeptor-Lötmaterial eine Legierung von 3 Gewichtsprozent Zink mit dem Rest Indium. Ein geeignetes Donator-Lötmaterial ist beispielsweise Zinn. Die Halbleitermedien werden auf dem Kopfstück für einen optischen Sender der in Fig. 1 dargestellten Art so angeordnet, daß die Übergänge in einer Ebene liegen. Zum Betrieb des in Fig. 1 dargestellten optischen Senders werden vorteilhafterweise dem ersten Halbleitermedium 1 und dem zweiten Halbleitermedium 2 Gleichstromimpulse hoher Stromdichte zugeführt. Um eine Überhitzung zu vermeiden, wird eine Impulsbreite zwischen etwa 1 und 10  $\mu$ sec gewählt. Da festgestellt wurde, daß der Schwellenwert für die stimulierten Emission kohärenter Lichtstrahlung beispielsweise für Galliumarsenid-Dioden von der Temperatur der Diode abhängt, kann es zweckmäßig sein, das erste Halbleitermedium 1 und das zweite Halbleitermedium 2 auf einer niedrigen Temperatur zu halten, um den Schwellenwert für die stimulierten Emission zu erniedrigen und die Verwendung einer Stromquelle für hohe Stromstärken zu vermeiden, oder um in gewissen Fällen eine kontinuierliche Betriebsweise zu ermöglichen.

Wenn die Halbleitermedien aus Galliumarsenid bestehen und in ein Dewar-Gefäß mit flüssiger Luft bei etwa 77° K eingetaucht werden, tritt der Schwellenwert der stimulierten Emission für kohärente Strahlung bei etwa 1000 A/cm<sup>2</sup> auf und fällt auf weniger als 100 A/cm<sup>2</sup> bei 20° K. Wenn der Übergang des ersten Halbleitermediums 1 und des zweiten Halbleitermediums 2 eine Flächengröße von jeweils etwa 0,001 cm<sup>2</sup> besitzt, reicht bei 77° K eine 2-A-Stromquelle und bei 20° K eine 0,2-A-Stromquelle aus.

Ein zweckmäßiges Verfahren zum Betrieb des in Fig. 1 dargestellten optischen Senders besteht darin, daß die veränderlichen Widerstände 7 und 8 auf ihren betreffenden maximalen Widerstand eingestellt werden und die Impulssquelle 5 erregt wird. Der Widerstand 7 wird danach so eingestellt, daß er einen geringen Widerstand bietet, was zu einer Erhöhung der Stromdichte in dem Übergang des ersten Halbleitermediums 1 führt. Die Intensität des aus dem ersten Halbleitermedium 1 austretenden Lichts wächst praktisch linear mit der Stromdichte, und das Licht ist inhomogen. Bei einer weiteren Erniedrigung des äqui-

valenten Reihenwiderstands des Widerstands 7 steigt die Intensität des aus der Oberfläche 19 und der Oberfläche 20 (falls diese nicht total reflektiert) austretenden Lichts nichtlinear, und das Licht wird plötzlich kohärent. Die Kohärenz wird durch Beugungsmuster senkrecht zu der Ebene des Übergangs angezeigt, was eine bestimmte Phasenbeziehung zwischen dem Licht bedeutet, das von verschiedenen seitlichen Teilen des pn-Übergangs 13 des ersten Halbleitermediums 1 emittiert wird. Gemäß der Erfahrung wird das erste Halbleitermedium 1 praktisch bei dem Schwellenwert für die kohärente Strahlung, d.h. bei einer Stromdichte betrieben, bei welcher die kohärente Strahlung beginnt. Danach wird der veränderliche Widerstand 8 kontinuierlich einjustiert, um eine Erniedrigung des Reihenwiderstands zu bewirken, bis die gewünschte Intensität kohärenter Strahlung von der Oberfläche 29 des zweiten Halbleitermediums 2 austritt. Deshalb wird der pn-Übergang des zweiten Halbleitermediums 2 in Durchlaßrichtung hinreichend vorgespannt, um darin eine Inversion der Besetzungsverteilung zu bewirken. Das zweite Halbleitermedium 2 ist auf Stromdichten unterhalb seines Schwellenwertes für kohärente Strahlung begrenzt, so daß nur eine kolineare Verstärkung der von dem ersten Halbleitermedium 1 empfangenen Strahlung in dem pn-Übergang 23 des zweiten Halbleitermediums 2 auftritt. Die empfangene Strahlung wird ohne weiteres in ihrer Intensität verdoppelt, wenn die Länge des Übergangs 23 in Richtung der Wellenausbreitung nur etwa 0,4 mm beträgt.

Fig. 2 zeigt eine Ansicht eines kolinear verstärkenden zweiten Halbleitermediums 35 mit antireflektierenden Überzügen 36 und 37, das aber sonst wie das zweite Halbleitermedium in Fig. 1 ausgebildet ist. Gleiche Bezugszeichen bezeichnen gleiche Komponenten mit Ausnahme der zu erläutern Abwandlungen. Die Überzüge 36 und 37 auf den Oberflächen 30 und 29 machen das zweite Halbleitermedium 35 weiter dazu geeignet, eine kolineare Verstärkung zu bewirken. Der Überzug dient neben der Verringerung innerer Reflexionen auch dazu, den Wirkungsgrad des zweiten Halbleitermediums beim Empfang von Strahlung zu erhöhen, die von dem ersten Halbleitermedium 1 auf dessen pn-Übergang fällt. Wenn die Querabmessung des Übergangs 23 relativ zu der Richtung der gewünschten Wellenausbreitung mit der Länge des Übergangs 23 in Richtung der Ausbreitung vergleichbar ist, sind derartige Überzüge an den Seitenflächen von Vorteil, um Schwingungen in Querrichtung zu verhindern.

Die eine Reflexion verhindernenden Überzüge werden vorteilhaft so ausgebildet, daß deren Dicke etwa gleich ungeradzahligen Vielfachen von ein Viertel Wellenlänge in Richtung der Wellenausbreitung ist. Ein besonders geeignetes Material für diese Überzüge ist Siliziummonoxyd, das ohne weiteres auf die Oberflächen des zweiten Halbleitermediums aufgedampft werden kann. Siliziummonoxyd ergibt eine Oberflächenpassivierung, beispielsweise von Galliumarsenid, und hat ferner einen Brechungsindex, der zwischen demjenigen von Luft und Galliumarsenid liegt. Die letztere Eigenschaft ist sehr wünschenswert, um einen glatten optischen Übergang in und aus dem Halbleitermedium zu gewährleisten. Im Idealfall ist der Brechungsindex des Materials für die reflektierenden Überzüge gleich der Wurzel aus dem Bre-

chungsindex des Halbleitermediums, wenn die Wellenausbreitung in oder aus Vakuum, Luft oder anderen Gasen erfolgt, deren Brechungsindex etwa gleich 1 ist. Der Überzug wird auch vorteilhaft so ausgewählt, daß er in an sich bekannter Weise mehrere Schichten aufweist.

Fig. 3 zeigt ein anderes Ausführungsbeispiel eines optischen Senders gemäß der Erfindung. Der optische Sender enthält ein erstes Halbleitermedium 1, das im wesentlichen genau wie in Fig. 1 ausgebildet ist und auf einem Kopfstück 40 aus Leitermaterial angeordnet ist. Das Kopfstück 40 ist entlang einer Querlinie 41 abgebogen, so daß sich zwei winklig zueinander versetzte Abschnitte 42 und 43 ergeben. Das zweite Halbleitermedium 44 hat einen entartet p-leitend dotierten Bereich 45, einen entartet n-leitend dotierten Bereich 46 sowie einen ebenen pn-Übergang 47 zwischen und angrenzend an die Bereiche 45 und 46.

Im Gegensatz zu Fig. 1 sind getrennte Impulsquellen 48 und 49 für das erste Halbleitermedium 1 bzw. das zweite Halbleitermedium 44 vorgesehen. Die Impulse von den Impulsquellen 48 und 49 werden in Abhängigkeit von elektrischen Signalen ausgelöst, welche von einer Impuls-Synchronisierereinrichtung 50 empfangen werden, welche zweckmäßigerweise einstellbar ist, um die zeitliche Beziehung zwischen den Impulsen zu steuern, welche von den Impulsquellen 48 und 49 abgegeben werden. Die Impulsquelle 48 ist mit dem ersten Halbleitermedium 1 über den einstellbaren Reihenwiderstand 7 und den Leiter 18 verbunden, wobei der Stromkreis durch einen Leiter 51 vervollständigt wird, welcher mit dem Teil 42 des Kopfstecks 40 verbunden ist. In entsprechender Weise ist die Impulsquelle 49 mit dem zweiten Halbleitermedium 44 über einen einstellbaren Reihenwiderstand 52 und einen Leiter 53 verbunden, wobei der Stromkreis über einen Leiter 54 geschlossen ist, der mit dem Teil 43 des Kopfstecks 40 verbunden ist. Es ist nicht erforderlich, daß das Kopfstück 40 ein kontinuierlich leitendes Glied ist, obwohl es vorzuziehen ist, daß das Kopfstück 40 ein kontinuierliches Glied ist, um dem optischen Sender eine ausreichende mechanische Steifigkeit zu verleihen.

Der Grund für die Verwendung getrennter Impulsquellen ist darin zu sehen, daß die Halbleitermedien besser elektrisch isoliert werden können. Getrennte Impulsquellen ergeben ferner einen besonders zweckmäßigen optischen Sender mit gewünschtenfalls sehr schmalen Impulsbreiten, indem die Synchronisierereinrichtung 50 so einjustiert wird, daß nur eine verhältnismäßig kleine steuerbare Zeit der Überlappung von Impulsen bewirkt wird, welche von den beiden Quellen geliefert werden (Impuls-codemodulation). Getrennte Quellen können auch im Falle des optischen Senders in Fig. 1 Verwendung finden. Vorzugsweise ist die Synchronisierereinrichtung 50 so ausgebildet, daß sie ein Signal liefert, welches gewünschtenfalls eine stetige Anregung der Übergänge 13 und 47 durch die Impulsquellen 48 bzw. 49 bewirkt.

Wie bereits beschrieben wurde, ermöglicht die Erfindung die Erzeugung kohärenter Strahlung hoher Intensität, wenn das erste Halbleitermedium 1 lediglich in der Nähe seines Schwellenwerts für eine stimulierten Emission kohärenter Strahlung angeregt

wird. Bei diesen Bedingungen senden Halbleitermedien oft eine Strahlung aus, die nicht nur kohärent, sondern auch polarisiert ist. Normalerweise verläuft die Richtung der Polarisation senkrecht zu der Ebene des pn-Übergangs, aus dem die Abstrahlung erfolgt.

Das in Fig. 3 dargestellte Ausführungsbeispiel liefert eine kohärente Strahlung 60 hoher Intensität, die außerdem polarisiert ist. Die Richtung der Polarisation oder des dargestellten elektrischen Feldvektors  $E$  verläuft senkrecht zu der Ebene des Übergangs 47. Die Polarisation der Strahlung 60 wird durch die Strahlung 3 von dem ersten Halbleitermedium 1 bewirkt, auch wenn diese nicht polarisiert ist. Ein besonders vorteilhafter optischer Sender ergibt sich jedoch, wenn die Strahlung 3 in der dargestellten Weise in der Einfallebene auf die Oberfläche 55 des zweiten Halbleitermediums 44 polarisiert ist.

Nach dem Gesetz von Brewster wird praktisch die gesamte Strahlung gebrochen und kein Anteil reflektiert, wenn in der Einfallebene polarisierte Strahlung auf eine Oberfläche unter einem Einfallwinkel auffällt, bei welchem die reflektierten Strahlen senkrecht zu den gebrochenen Strahlen liegen. Deshalb werden die beiden Halbleitermedien vorteilhaft so zueinander angeordnet, daß der Einfallwinkel 56 der Strahlung 3 auf die Oberfläche 55 etwa gleich dem Komplement des Brechungswinkels 57 der Strahlung (Brewster-Winkel) in dem zweiten Halbleitermedium 44 ist, d. h. also, die Summe der Winkel 56 und 57 angenähert  $90^\circ$  beträgt. Die Oberfläche 55 ist so abgespalten oder geschnitten, daß sie den Übergang 47 unter einem Winkel schneidet, der etwa gleich dem Einfallwinkel 57 ist.

In dem üblichen Fall, bei dem der Brechungsindex des Mediums zwischen den beiden Halbleitermedien praktisch gleich 1 ist, beispielsweise in Vakuum, Gas, flüssigem Stickstoff oder Sauerstoff, wird der Einfallwinkel 56 vorteilhaft so ausgewählt, daß er im wesentlichen gleich dem Winkel ist, dessen Anstieg gleich dem Brechungsindex des Halbleitermaterials ist, aus dem das zweite Halbleitermedium 44 hergestellt ist. Wenn das Halbleitermaterial beispielsweise Galliumarsenid ist, das einen Brechungsindex von 3,5 hat, werden die Halbleitermedien so angeordnet, daß der Einfallwinkel etwa  $74^\circ$  beträgt. Der Brechungswinkel in den Übergang 47 beträgt dann etwa  $16^\circ$ .

Wenn die obenerwähnten Bedingungen durch eine geeignete Anordnung des zweiten Halbleitermediums 44 relativ zu dem ersten Halbleitermedium 1 erfüllt sind und wenn die Strahlung 3 in der dargestellten Weise in der Einfallebene polarisiert ist, tritt praktisch die gesamte Strahlung in den Übergang 47 ein, ohne daß eine Reflexion von der Oberfläche 55 erfolgt. Kein antireflektierender Überzug wird dann auf der Oberfläche 55 benötigt, und die Halbleitermedien können so nahe zueinander angeordnet werden, wie es mechanische Begrenzungen ermöglichen. Die empfangene Strahlung breitet sich durch den Übergang 47 mit exponentiell ansteigender Intensität aus und tritt durch die Oberfläche 58 aus, welche zweckmäßigerweise mit einem antireflektierender Überzug 59 versehen ist. Die austretende Strahlung 65 16 hoher Intensität ist weiterhin in einer Richtung polarisiert, weil das zweite Halbleitermedium 44 eine kolineare Verstärkung bewirkt.